

学校编号: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学号: 19820091152512

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

核磁共振室温匀场电源与场频联锁系统  
一体化——核心板高速电路设计

The High Speed Circuit Design for Room Temperature Shim  
Power and Field-frequency Interlock System Integration  
Core Board for NMR

王 玉

指导教师姓名: 郑振耀 副教授

专 业 名 称: 电磁场与微波技术

论文提交日期: 2012 年 05 月

论文答辩时间: 2012 年 06 月

学位授予日期: 2012 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2012 年 06 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为( )课题(组)的研究成果，获得( )课题(组)经费或实验室的资助，在( )实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于        年        月        日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年        月        日

## 摘 要

均匀、稳定的磁场是获得高分辨核磁共振波谱的关键，但是强磁场的微小非均匀性和不稳定性，导致 NMR 谱仪分辨率不高，可以通过室温匀场电源和场频联锁系统达到磁场的均匀性和稳定性。室温匀场电源主要通过改变多路匀场线圈的电流值，利用线圈所产生的磁场来补偿磁场本身的非均匀性，达到均匀磁场的目的；场频联锁系统可以有效补偿强磁场的漂移，改善磁场的长期稳定度，达到稳定磁场的目的。

本文以国家自然科学基金“基于电化学——核磁共振联用系统的研制及其应用”为课题背景。论文首先论述了核磁共振原理、匀场电源技术和场频联锁技术，根据匀场电源和场频联锁一体化功能需求，设计出了系统的核心板硬件电路，绘制了印制板，并且对印制板进行了焊接和硬件调试。设计的核心板为十层高速电路板，绘制高速印制板较低速印制板复杂，需要注意的事项较多，比如印制板布局布线，差分信号印制线和单端信号印制线厚度、间距、线宽，印制板层叠设计，印制线布线原则等问题，本文均作了详细说明。最后简单介绍了 FPGA 的开发工具、开发流程和硬件描述语言，并对硬件电路进行了调试。

试验结果表明，采用具有硬核的可编程 FPGA 配合外围存储电路和扩展接口电路方案，实现匀场电源和场频联锁一体化核心控制电路，不但可以减小硬件电路的体积，降低硬件电路的功耗，便于实现设备部件的小型化和模块化，而且方便对产品进行维护及软件升级，同时降低了硬件电路设计的风险。

**关键词：**核磁共振波谱仪；高速电路；印制板

## Abstract

Uniform and stable magnetic field is the key to obtain high-resolution NMR (Nuclear Magnetic Resonance) spectroscopy, and small non-uniformity and instability of strong magnetic field results in the NMR spectrometer resolution is not high. By way of room temperature shim power and field-frequency interlock system, it can achieve the homogeneity and stability of magnetic field. Changing the current value of the multi-channel shim coils, and using the magnetic field generated by the coil can compensate non-uniformity magnetic field. Using field-frequency interlock technology can effectively compensate drift of the strong magnetic field, improve long-term stability and get stable magnetic field.

This paper is in the background of National Natural Science Fund, based on the electrochemical--NMR coupling system development and its application. First, the paper discusses the principles of NMR, shim power technology and field-frequency interlock technology. According to function demand of shim power and field-frequency interlock integration; author designs core board hardware circuit of the system, renders the PCB (Printed Circuit Board), welds and debugs the PCB. The core plate is high speed circuit board with ten layers. Drawing high speed PCB is more complex than drawing lower speed PCB, and it needs more attentions, such as PCB layout, thickness, spacing, line width of differential signal lines and single signal lines, design of PCB layout and wiring principle. This article has made detailed description. Finally, the article briefly introduces FPGA development tools, development process and hardware description language, laying the foundation for software development of FPGA.

The test results show that using programmable FPGA with a hard core of with peripheral storage circuits and extension interface circuits can realize core control circuit of shim power and field-frequency interlock integration. It can not only reduce the volume of hardware circuit and power consumption of the hardware circuit, and be convenient to realize miniaturization and modularization of equipment component,

but also be convenient to maintenance product and to upgrade software, reducing the risk of hardware circuit design at the same time.

**Keywords:** NMR Spectrometer; High Speed Circuit; PCB

厦门大学博士论文摘要库

# 目 录

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	II
第一章 绪 论 .....	1
1.1 核磁共振概述 .....	1
1.2 核磁共振谱仪 .....	1
1.3 匀场电源 .....	2
1.4 场频联锁系统 .....	4
1.4.1 场频联锁系统原理 .....	4
1.4.2 场频联锁系统组成 .....	5
1.5 课题背景 .....	6
1.6 论文研究的主要内容 .....	7
第二章 硬件电路设计 .....	8
2.1 硬件电路方框图 .....	8
2.2 电源管理模块 .....	8
2.3 内存模块 .....	10
2.4 程序存储模块 .....	12
2.5 FPGA 模块 .....	16
2.6 串口通信模块 .....	19
2.7 以太网接口模块 .....	21
2.8 复位控制模块 .....	23
2.9 时钟管理模块 .....	23
2.10 本章小结 .....	24
第三章 高速电路设计 .....	25
3.1 高速电路 .....	25
3.2 高速电路设计面临的问题及解决方法 .....	25
3.2.1 印制板的电磁兼容性 .....	26

3.2.2 印制板的信号完整性.....	28
3.2.3 印制板的电源完整性.....	31
<b>3.3 多层 PCB 板层叠设计 .....</b>	<b>32</b>
3.3.1 多层 PCB 板层叠设计原则 .....	32
3.3.2 信号层、接地层和电源层的排布 .....	32
3.3.3 接地层与电源层的作用 .....	33
<b>3.4 高速电路 PCB 的布局和布线 .....</b>	<b>34</b>
3.4.1 高速电路 PCB 元器件布局 .....	34
3.4.2 印制线厚度、宽度、间距和长度 .....	35
3.4.3 阻抗匹配原理 .....	39
3.4.4 印制线布线原则 .....	43
3.4.5 核心板的差分信号 .....	45
<b>3.5 焊盘和过孔 .....</b>	<b>46</b>
<b>3.6 印制板厚度 .....</b>	<b>47</b>
<b>3.7 本章小结 .....</b>	<b>48</b>
<b>第四章 FPGA 开发基础 .....</b>	<b>49</b>
4.1 FPGA 开发工具 .....	49
4.2 FPGA 开发流程 .....	50
4.3 硬件描述语言 .....	53
4.4 本章小结 .....	54
<b>第五章 硬件调试 .....</b>	<b>55</b>
<b>第六章 总结及展望 .....</b>	<b>57</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>58</b>
<b>攻读硕士学位期间发表论文 .....</b>	<b>61</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>62</b>



# CONTENTS

<b>A b s t r a c t i n</b>	
<b>Chinese</b> .....	
. . . . .	I
<b>A b s t r a c t i n</b>	
<b>English</b> .....	
. . . . .	I
<b>C h a p t e r 1</b>	
<b>Introduction</b> .....	
. . . . .	1
<b>1 . 1 O v e r v i e w o f</b>	
<b>NMR</b> .....	
. . . . .	1
<b>1 . 2 N M R</b>	
<b>spectrometer</b> .....	
. . . . .	1
<b>1 . 3 S h i m</b>	
<b>power</b> .....	
. . . . .	2
<b>1 . 4 F i e l d - f r e q u e n c y i n t e r l o c k</b>	
<b>system</b> .....	4
1 . 4 . 1 T h e o r y o f f i e l d - f r e q u e n c y	
interlock.....	4
1 . 4 . 2 F o r m o f f i e l d - f r e q u e n c y	
interlock.....	5
<b>1 . 5 P r o j e c t</b>	
<b>background</b> .....	
. . . . .	6
<b>1 . 6 M a i n c o n t e n t o f t h e</b>	

thesis.....	7
<b>Chapter 2 Design of hardware circuit.....</b>	<b>8</b>
2.1 Hardware circuit diagram.....	8
2.2 Power management module.....	8
2.3 Memory module.....	10
2.4 Program storage module.....	12
2.5 FPGA module.....	16
2.6 Serial communication module.....	19
2.7 Ethernet interface module.....	21
2.8 Reset control module.....	23
2.9 Clock management module.....	23
2.10 Chapter summary.....	24
<b>Chapter 3 Design of high speed circuit.....</b>	<b>25</b>
3.1 High speed circuit.....	5
3.2 Problems and Solutions of high speed circuit design.....	25
3.2.1 Electro-magnetic compatibility of PCB.....	26

3 . 2 . 2	S i g n a l i n t e g r i t y o f PCB.....	28
3 . 2 . 3	P o w e r i n t e g r i t y o f PCB.....	31
<b>3 . 3</b>	<b>L a y o u t d e s i g n o f M u l t i l a y e r PCB .....</b>	<b>31</b>
3.3.1	Layout design principles of Multilayer PCB.....	32
3.3.2	Arrangement of signal layer, ground layer and power l a y e r . . . . .	3 2
3 . 3 . 3	R o l e o f g r o u n d l a y e r a n d p o w e r layer.....	33
<b>3 . 4</b>	<b>L a y o u t a n d w i r i n g o f h i g h s p e e d PCB.....</b>	<b>33</b>
3.4.1	Components layout of high speed PCB.....	33
3.4.2	Thickness, width, spacing and length of printed w i r e . . . . .	3 5
3 . 4 . 3	P r i n c i p l e o f i m p e d a n c e matching.....	39
3 . 4 . 4	W i r i n g p r i n c i p l e s o f p r i n t e d wire.....	43
3.4.5	The differential signal of the core plate . . . . .	44
<b>3 . 5</b>	<b>P a d s a n d vias.....</b>	<b>4 6</b>
<b>3 . 6</b>	<b>P C B thickness.....</b>	<b>4 7</b>
<b>3 . 7</b>	<b>C h a p t e r summary.....</b>	<b>4 8</b>

## **Chapter 4 Development Foundation of F P G A . . . . . 4 9**

4 . 1	D e v e l o p m e n t t o o l s o f FPGA.....	49
4 . 2	D e v e l o p m e n t p r o c e s s o f	

<b>FPGA</b> .....	<b>50</b>
<b>4 . 3     H a r d w a r e   d e s c r i p t i o n</b> <b>language</b> .....	<b>53</b>
<b>4         4             C   h   a   p   t   e   r</b> <b>summary</b> .....	<b>5         4</b>
<b>C   h   a   p   t   e   r         5         H a r d w a r e</b> <b>debug</b> .....	<b>55</b>
<b>C   h   a   p   t   e   r         6         S u m m a r y   a n d</b> <b>Prospect</b> .....	<b>57</b>
<b>References</b> .....	
. . . . .	<b>5     8</b>
<b>Publications</b> .....	
. . . . .	<b>6     1</b>
<b>Acknowledgements</b> .....	
. . . . .	<b>6     2</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 核磁共振概述

核磁共振<sup>[1][2]</sup>(NMR, Nuclear Magnetic Resonance)是 20 世纪 40 年代中期发现的低能量电磁波(即射频波)与既有角动量又有磁矩的核系统在外磁场中相互作用所表现出的共振特性。并不是所有原子核都能产生这种现象,原子核能产生核磁共振现象是因为具有核自旋,原子核自旋产生磁矩,当核磁矩处于静止外磁场中时产生进动核和能级分裂。在低能量交变磁场作用下,自旋核会吸收特定频率的电磁波,从较低能级跃级到较高能级,其本质为一种能级间跃迁的量子效应,利用这一现象可以研究物质的微观结构。通常人们所说的核磁共振指的是利用核磁共振现象获得分子结构、人体内部结构信息的技术。

由于核磁共振可获取的信息丰富,又是一种无损测量技术,因此核磁共振波谱仪应用领域十分广泛,我国近年来也有较快发展,如在固体物理、半导体物理、金属物理方面用磁共振测定材料的微观结构,研制新型的半导体材料与合金材料,测量半导体中的掺杂;在有机化学、生物学方面,用于测定一些有机大分子的分子式及其结构;在医学、药物研究方面的应用有自旋密度,研究药物对人体有无毒性反应;以及在植物生理学上研究光合作用的机理等,核磁共振技术还日益向生产方面推广。

### 1.2 核磁共振谱仪

核磁共振波谱仪<sup>[3][4][5]</sup>主要由 4 部分组成,如图 1.1 所示:

(1) 主计算机包括:主机、显示器以及相关附件,可选择运行 Windows、Linux 或 Unix 操作系统。

(2) 主机柜系统:包括射频频率源、控制台、射频功率放大器、脉冲梯度场驱动器、场频联锁系统以及多路室温匀场电源等部件。其中控制台是核磁共振波谱仪的最核心部件,包括:系统时钟单元、主控制单元、锁系统单元、双通道全频带射频发射机、数字化宽带接收机。

(3) 磁体接口系统:包括气动控制单元,调谐接口,前置放大器以及射频

混频器等。

(4) 超导磁体与探头：包括超导磁体、探头、室温匀场线圈等。

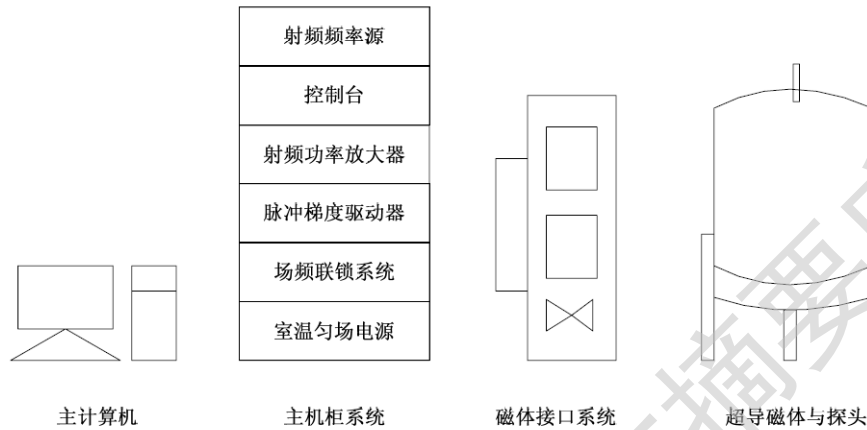


图 1.1 核磁共振谱仪系统结构图

为了获得高分辨图谱，需要核磁共振谱仪有很高的分辨率。如果仪器本身分辨率不高，不但会造成谱线加宽，而且还会导致相邻的谱线重叠不能分开，影响对图谱的解析工作。影响分辨率的因素是磁场分布的空间均匀性和时间稳定性，也就是说，谱仪产生磁场的均匀性越好、稳定性越好，分辨率就越高。磁场的均匀性需要采用匀场电源技术，磁场的稳定性需要采用场频联锁技术，下面分别予以介绍。

### 1.3 匀场电源

超导磁体在高分辨率 NMR 谱仪中广泛应用。虽然超导磁体自身已经有超导匀场线圈，但周围环境（温度、电磁干扰等）的变化影响磁场的均匀性，因此需要有多路室温匀场线圈快速补偿磁场的非均匀性。室温匀场电源是谱仪中的核心部件之一，作为匀场控制的执行部分，负责向多路匀场线圈提供恒定、高精度而可调的电流，锁场输入、锁场控制及匀场输入均需要通过室温匀场电源实现。

如果样品周围的磁场是均匀的<sup>[6][7]</sup>，如图 1.2(a)所示，各处磁场值都是一样等于  $B_0$ ，那么样品中全部原子核发生共振的条件都一样，即都在  $\omega = \gamma B_0$ （ $\omega$  为共振角频率， $\gamma$  为磁旋比， $B_0$  为外磁场强度）的频率下共振，这时谱线的宽度由自然宽度来决定。

如果样品周围的磁场分布是不均匀的，如图 1.2(b)所示，空间各点的磁场强

度不一样。为了便于分析，把样品管分为五个区域，假设每个区域中磁场值一样，并假设从上到下磁场强度由高向低下降，由于五个区域具有不同的磁场强度，因此它们的共振条件不同，即共振频率不同。如果以频率为刻度，它们的谱线就出现在五个位置上，变为五条谱线。实际上是由于磁场强度的不均匀，导致一条谱线加宽为五条，可见由于磁场不均匀会使谱线加宽同时强度变小。

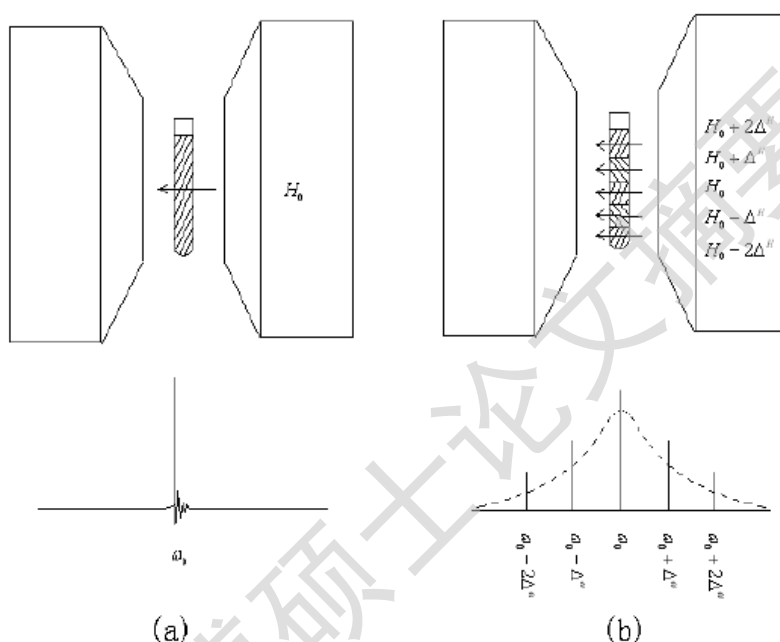


图 1.2 磁场梯度变化引起的谱线加宽

磁体本身所能达到的基础分辨率一般是  $5 \times 10^{-7}$ ，为了进一步提高分辨率，高分辨核磁共振仪都采用室温匀场线圈方法：通过匀场电源改变匀场线圈的电流值，利用匀场线圈所产生的磁场来补偿磁场本身的微小非均匀性。匀场线圈的作用如图 1.3 所示，假设磁场强度有一个梯度，调节匀场线圈中的电流大小与方向，使它产生的磁场梯度正好与 a 图的大小相等方向相反，这样(a)图与(b)图之和等于(c)图。从而抵消了原来的磁场梯度，获得了一个均匀磁场。使用匀场电源控制匀场线圈的优越性在于，可以在离磁铁较远的地方调节磁场的均匀性，工作起来方便、简单、有效。

NMR 谱仪磁场的均匀性需要利用多路高稳定、高精度的室温匀场线圈来实现，匀场电源作为匀场控制的执行部分，负责向匀场线圈提供恒定而可调的电流。不同的匀场线圈可以产生不同形式的磁场强度，比如 X，Y，Z 匀场线圈可分别

产生沿 X, Y, Z 方向线性变化的磁场, 而  $Z^2$  线圈可产生沿 Z 方向以二次幂变化的磁场。相同的匀场线圈产生的磁场强度与其电流值成正比, 因此在 NMR 谱仪中, 匀场电源的工作原理如下: 通过谱仪控制台改变匀场电源控制数据从而控制各个匀场线圈的电流值, 并最终达到控制各个匀场线圈产生的磁场。通过对不同匀场线圈电流值的组合优化, 可以实现对 NMR 谱仪主磁场均匀性的最佳化。

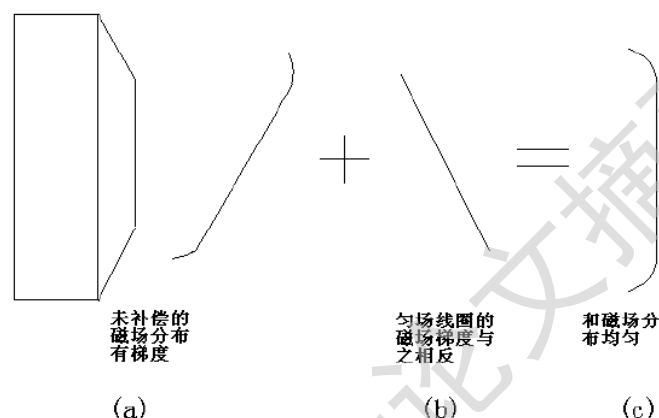


图 1.3 匀场线圈的作用原理

## 1.4 场频联锁系统

### 1.4.1 场频联锁系统原理

高分辨率的 NMR 谱仪, 不仅要求其磁体具有高磁场强度, 而且要求磁场稳定, 并保证样品区域的磁场强度均匀。但是, 强磁场对环境 (温度、电磁干扰等) 十分敏感, 容易产生漂移, 降低了谱仪的分辨率和稳定度。磁场稳定性对 NMR 谱仪的影响归根结底是磁场强度的变化导致 NMR 共振频率发生变化, 使其相对于激发射频场的频率产生偏离, 谱线发生移动。因此, 研究 NMR 谱仪磁场稳定的方法十分重要。

NMR 谱仪的稳定性分为短期稳定性和长期稳定性。磁通稳定器技术是改善谱仪短期稳定性的方法, 超导磁体冷却系统的控制机制和控制台系统的场频联锁技术是改善系统长期稳定性的方法。场频联锁技术, 就是使谱线的共振频率对谱仪的射频频率保持相对稳定, 避免谱线的移动, 消除磁场不稳定性的影响, 改善磁场的长期稳定度。

选择某一 NMR 信号作为标准信号, 称为锁信号<sup>[8]</sup> (氘核的 NMR 信号), 以



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库